

文章编号: 2095-4980(2018)04-0692-05

发射机谐波电平测量方法

范秋虎, 何洪涛, 刘心愿, 谭克松

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要:提出了在发射机谐波电平测量中存在的问题和现象,分析了频谱分析仪的工作原理,以混频器的多项式非线性模型为基础,深入研究了频谱分析仪非线性响应对发射机谐波电平测量的影响,给出了影响程度的预测模型,根据谐波电平测量的工程需求,给出了便于工程应用的发射机谐波电平测量方法。

关键词: 谐波; 混频器; 非线性; 测量方法

中图分类号: TN98

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0692

Measurement method of transmitter harmonic level

FAN Qiuhu, HE Hongtao, LIU Xinyuan, TAN Kesong

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: The problems and phenomena in the harmonic level measurement of transmitter are presented. After analyzing the working principle of spectrum analyzer, based on the polynomial nonlinear model of mixer, the influence caused by the nonlinear response of the spectrum analyzer on the harmonic level measurement is studied. The prediction model of the influence degree is given. And according to the engineering requirement of harmonic level measurement, a method of harmonic level measurement for transmitter is presented.

Keywords: harmonic; mixer; nonlinear; measurement method

射频功率放大器是无线通信系统中的关键器件,在发射机中用于将已调制的频带信号放大到所需的功率,并送往天线中发射。射频功率放大器是一个非线性器件,在发射基波信号的同时,也会发射一些非线性产物,其中谐波发射是其最重要的非线性分量。不需要的谐波发射,会对卫星导航接收机等高灵敏度接收机产生意外的干扰^[1-2],因此谐波抑制度是发射机的一个重要技术指标,是对发射机性能的重要考核参数之一。一般情况下,谐波电平低于基波电平 40 dB 以上。在相关标准和检测规程中,通常采用源设备(信号源或无线电设备的发射机)产生的发射信号经衰减器后,再进入频谱分析仪进行测量的方法^[3-6]。然而在实际测量过程中,会出现发射机谐波电平测量时出现随着频谱分析仪内置衰减器衰减量的不同,发射机谐波测量值也随之有较大波动的现象。

本文在深入分析频谱分析仪非线性响应基础上,对谐波测量值波动现象进行了解析,提出了谐波测量值准确性的判断准则,形成了便于工程应用的谐波测量方法。

1 频谱分析仪的非线性响应对谐波测量的影响分析

1.1 频谱分析仪的基本工作原理

典型超外差频谱分析仪^[7-8]的结构框图如图 1 所示。“外差”是指混频,即对频率进行转换,而“超”则是指超音频频率或高于音频的频率范围。

从图 1 中可以看到,输入信号先经过一个衰减器,再经低通滤波器到达混频器,然后与来自本振频率(Local Oscillator, LO)的信号相混频,混频器将输入信号的频率变换为固定的中频信号。处理过程包括包络检波、数字化及显示。扫描信号发生器在屏幕上产生从左到右的水平移动,同时它还对本振进行调谐,使本振频率的变化与斜坡电压成正比。

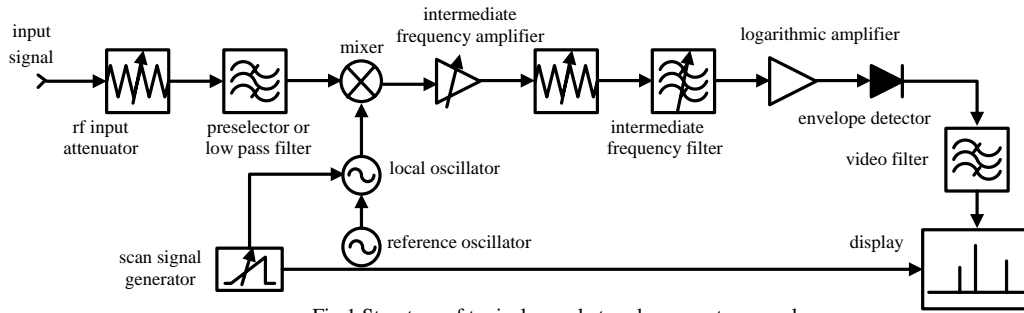


Fig.1 Structure of typical superheterodyne spectrum analyzer
图 1 典型超外差频谱分析仪的结构图

射频输入衰减器是频谱分析仪的第一部分，它的作用是保证信号在输入混频器时处在合适的电平上，从而防止发生过载、增益压缩和失真。由于衰减器是频谱分析仪的一种保护电路，所以它通常是基于参考电平而自动设置，不过也能以某些特定的步进量如 5 dB 进行手动选择衰减量。射频输入器的衰减量在中频增益放大器中又得到补偿，从而保证测量值的一致性。

1.2 频谱分析仪的非线性响应

混频器是决定频谱分析仪动态范围的关键性器件，混频器是非线性器件，可用如图 2 所示的模型表示。其中，非线性模型可用非线性多项式表示：

$$U_o(t) = a_0 + a_1U_i(t) + a_2U_i^2(t) + a_3U_i^3(t) + \dots + a_nU_i^n(t) + \dots \tag{1}$$

式中： U_i 为输入信号电压； U_o 为输出信号电压； a_i 为多项式系数， $i=0,1,2,\dots$ 。

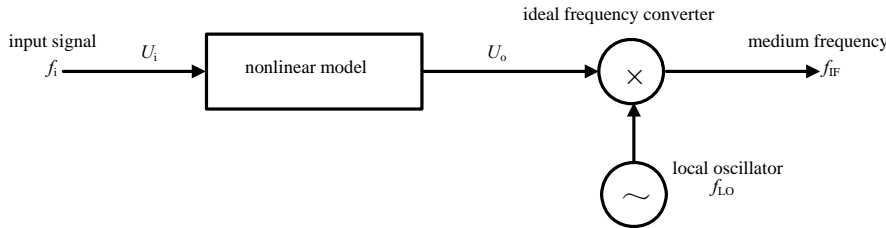


Fig.2 Block diagram of mixer model
图 2 混频器模型框图

频谱分析仪具有输入信号幅度要求，在输入信号幅度限值以内，可认为频谱分析仪内的混频器是弱非线性系统，可以只取式(1)的前 4 项，并忽略直流项 a_0 ，即可近似表示为：

$$U_o(t) = a_1U_i(t) + a_2U_i^2(t) + a_3U_i^3(t) \tag{2}$$

当输入信号为 $U_i(t) = A\cos \omega_1 t$ 时， $U_o(t)$ 为：

$$U_o(t) = \left(a_1A + \frac{3}{4}a_3A^3 \right) \cos \omega t + \frac{1}{2}a_2A^2 \cos 2\omega t + \frac{3}{4}a_3A^3 \cos 3\omega t \tag{3}$$

可得图 2 中非线性模型输出的谐波电压分别为：

2 次谐波

$$U_{o_2} = k_2A^2 \tag{4}$$

3 次谐波

$$U_{o_3} = k_3A^3 \tag{5}$$

式中： k_2 为 2 次谐波电压增益因子， $k_2 = a^2/2$ ； k_3 为 3 次谐波电压增益因子， $k_3 = 3a^2/4$ 。

1.3 频谱分析仪的非线性响应对待测谐波电平的影响

由图 2 可知，理想变频器的输入信号除包含待测的谐波信号外，还包含由于混频器非线性而产生的同频谐波信号，因此，混频器的输出信号是 2 个同频谐波信号的叠加，当 2 个谐波信号功率电平相当时，就会产生测量误差。根据 2.1 节的讨论，当设置频谱分析仪的前置衰减器为某一衰减量时，频谱分析仪的中频放大器又对衰减量进行补偿，从而保证测量示值的一致性。利用频谱分析仪这一功能从理论上进一步讨论频谱分析仪的非线性对谐波测量的影响程度。

设被测件输出的基波信号为:

$$U_s = A_s \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (6)$$

则其 n 阶谐波信号为($n=2,3$):

$$U_n = A_n \cos(\omega_0 t + n\theta_0 + \theta_n) \quad (7)$$

式中 θ_n 为发射机产生谐波信号的变换过程, 以及通过发射机射频滤波而引入的相位延迟。

当频谱分析仪内置电压衰减系数为 m_U 时, 其内部产生的 n 阶谐波信号为:

$$U_r = k_{0n}(m_U A_0)^n \cos(\omega_0 t + n\theta_0 + \theta_r) = m_U^n A_r \cos(\omega_0 t + n\theta_0 + \theta_r) \quad (8)$$

式中: k_{0n} 为频谱分析仪混频器 n 次谐波电压增益因子; A_r 为 $m_U=1$ 时频谱分析仪内部产生的 n 阶谐波幅度, $A_r = k_{0n} A_0^n$; θ_r 为接收机产生谐波信号的变换过程引入的相位延迟。

频谱分析仪混频器输出的 n 阶谐波信号为:

$$U_c = m_U U_n + U_r = m_U A_n \cos(\omega_0 t + n\theta_0 + \theta_n) + m_U^n A_r \cos(\omega_0 t + n\theta_0 + \theta_r) = (m_U A_n \cos \theta_n + m_U^n A_r \cos \theta_r) \cos(\omega_0 t + n\theta_0) - (m_U A_n \sin \theta_n + m_U^n A_r \sin \theta_r) \sin(\omega_0 t + n\theta_0) = A_c \cos(\omega_0 t + n\theta_0 + \theta_c) \quad (9)$$

式中 A_c 和 θ_c 分别为合成振幅和合成相位, 其中:

$$A_c = \sqrt{m_U^2 A_n^2 + m_U^{2n} A_r^2 + 2m_U^{n+1} A_n A_r \cos(\theta_n - \theta_r)} \quad (10)$$

由于频谱分析仪中频放大器要对前置放大器的衰减量进行补偿, 则频谱分析仪实际测量的信号幅度 A 为:

$$A = m_U^{-1} A_c = \sqrt{A_n^2 + m_U^{2(n-1)} A_r^2 + 2m_U^{n-1} A_n A_r \cos(\theta_n - \theta_r)} \quad (11)$$

以功率值表示, 则为:

$$P = \frac{A^2}{2R} = P_n + m_U^{2(n-1)} P_r + \frac{m_U^{n-1} A_n A_r \cos(\theta_n - \theta_r)}{R} \quad (12)$$

式中: P_n 为待测件的 n 阶谐波功率; P_r 为 $m_U=1$ 时频谱分析仪内部产生的 n 阶谐波功率。式(12)可以说明以下 3 个问题:

- 1) 频谱分析仪的 n 阶谐波功率测量值不仅包含待测量 P_n , 还包含 2 个内部寄生分量(式(12)的后两项)。当内部寄生量不可忽视时, 将产生较大的测量误差;
- 2) 对于不同的 m_U , 内部寄生量的大小也不同, 测量值也随之不同, 因此测量值随频谱分析仪前置衰减量设置不同而产生波动;
- 3) 随着 m_U 的减小(衰减程度加大), 内部寄生量也随之减小, 并趋于 P_n 。

2 频谱分析仪内部噪声的影响及解决措施

2.1 频谱分析仪内部噪声与前置衰减量的关系

频谱分析仪显示的信号是叠加在平均噪声电平上的, 这个噪声是由频谱分析仪自身产生的宽带白噪声, 经过中频滤波器后送到包络检波器, 频谱分析仪的前置衰减器是宽带白噪声的主要来源。

当频谱分析仪的前置衰减增加时, 降低了加载到检波器上的信号电平, 而中频放大器的增益同时来补偿这个损失, 使其结果显示屏上信号位置保持不变。前置衰减量增加, 频谱分析仪自身的噪声不变, 但中频放大器增益的增加, 使得噪声电平被放大, 因此信噪比随着输入衰减量的增加而降低, 结果信噪比下降, 测试灵敏度降低, 图 3 可更清楚地表明这一过程。

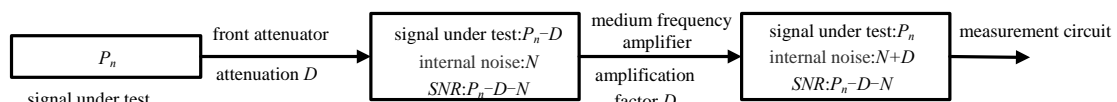


Fig.3 Signal power transfer process of spectrum analyzer

图 3 频谱分析仪前端信号功率传递过程

由图 3 可见, 由于前置衰减量 D (dB) 的存在, 进入测量电路的信噪比随 D (dB) 的增加而减小, 当被测信号非常小时, 其测量值抖动变化较大, 难以读取到精确数值, 或者被测信号被噪声淹没, 而无法获得测量值。

2.2 避免频谱分析仪内部白噪声电平增大的措施

根据 2.1 节的分析, 增大前置衰减器的衰减量的同时, 也抬高了频谱分析仪的底噪电平, 从而降低了频谱分析仪的测试灵敏度。为能够准确测量小功率信号, 可使用外置的机械式可调衰减器, 同时将频谱分析仪前置衰减

器的衰减量设置为 0 dB, 此时频谱分析仪具有最优的底噪特性, 同时机械式可调衰减器具有极低的噪声, 近似可忽略。此时, 频谱分析仪测量相同的信号时, 可以达到最优的测试灵敏度特性。

3 准确测量谐波电平的工程方法

3.1 谐波电平测量流程

由式(12)可知, 要获取谐波电平的准确测量数据, 可通过增大前置衰减器的衰减量, 使频谱分析内部寄生的谐波电平远小于待测的谐波信号电平, 当频谱分析仪的测量值基本稳定时, 则测量值即为待测的谐波信号电平。为便于工程应用, 本文提出如下测量流程。

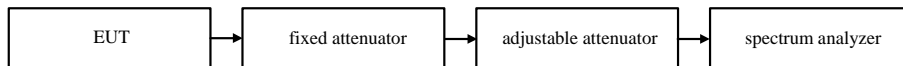


Fig.4 Configuration of radio equipment electromagnetic emission measurement
图4 无线电设备电磁发射测量配置框图

按图4连接设备, 图中的固定衰减器用于保护频谱分析仪, 使被测件的基波电平衰减至频谱分析仪的最大允许输入功率范围之内, 可调衰减器用于精确测量。

测试流程为:

1) 将频谱分析仪的前置衰减器衰减量设定为人工设置, 并置为 0 dB, 旨在使接收机的内部噪声最低;

2) 根据频谱分析仪的动态范围指标, 如 1 dB 压缩点, 设置外部固定衰减器的初值, 一方面保证频谱分析仪的安全, 二是保证被测信号的基波电平处于频谱分析仪线性动态范围内;

3) 观察并记录前置衰减量为 0 dB 时的谐波电平测量结果, 将频谱分析仪的前置衰减量重新设定为 5 dB, 再次观察并记录谐波电平测量结果, 并与前次的测量结果进行对比, 若测量结果的减小量超出某一限值(限值的设置取决于测量精确度, 通常应不大于 0.1 dB), 则认为测量结果内包含频谱分析仪内部的谐波分量, 否则将测量值加上外部衰减器的衰减量作为被测件的谐波电平;

4) 将频谱分析仪的前置衰减量恢复为 0 dB, 增大可调衰减器的衰减量, 重复步骤 3), 直至获得准确的被测件谐波电平为止。

3.2 谐波测量实例

以某型电台的谐波测试为例进行说明, 图5为2次谐波测量结果, 图6为3次谐波测量结果。

由图5和图6可知, 随着衰减量的增大, 测量值趋于恒定, 根据前面的分析, 该恒定值即为最终的测量结果。

由图5可见, 利用频谱分析仪的内置衰减器即可使测量值达到稳定, 而在图6中的3次谐波测量中, 由于谐波电平较低, 利用频谱分析仪的内置衰减器能够测量的极限状态距最终稳定值相差 3 dB 左右。

4 结论

本文深入分析了频谱分析仪的工作原理, 以多项式非线性模型为基础, 揭示了在谐波测量中频谱分析仪测量示值随前置衰减量变化的机理, 提出了发射机谐波测量的正确方法和测量流程, 并进行了实装测试验证。

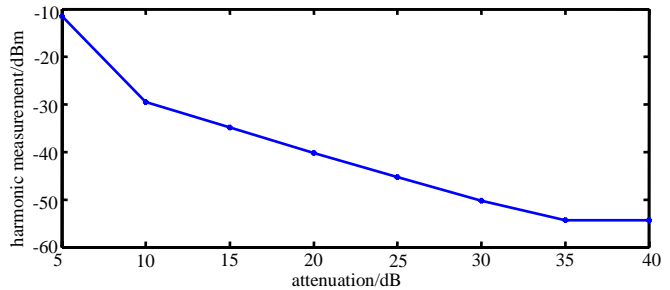


Fig.5 Variation curve of the 2nd order harmonic measurement value of a certain radio station and the attenuation of the spectrum analyzer
图5 某型电台2次谐波测量值与频谱分析仪前置衰减量的变化曲线

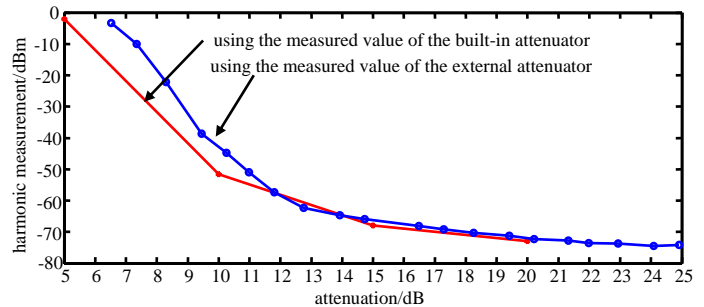


Fig.6 Change curves of the 3rd order harmonic and the decrement of a certain radio station
图6 某型电台3次谐波测量值与衰减量的变化曲线

谐波测量值波动问题的存在由来已久,但未引起人们的足够重视,常常以主观臆断的方式决定测量值的取舍,缺乏科学的依据。本文研究有效地回答了谐波测量值波动的原因和谐波测量值准确性的判断方法问题,有助于电子信息装备的试验鉴定和科学评估。

参考文献:

- [1] 张秦洲,刘亚芳,李昕. 超短波发射谐波干扰导航系统研究[J]. 测控技术, 2014(33):175-177. (ZHANG Qinzhou,LIU Yafang,LI Xin. Research on interfering navigation system transmitted by VHF harmonic wave[J]. Measurement & Control Technology, 2014(33):175-177.)
- [2] 夏爽. 无人机载干扰设备与导航 GPS 的电磁兼容[J]. 电子信息对抗技术, 2014,26(5):56-58. (XIA Shuang. Electromagnetic compatible between jamming equipment and navigation GPS mounted in UAV[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2011,26(5):56-58.)
- [3] 中华人民共和国电子工业部. GJB151A-1997 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S]. 北京:国防科学技术工业委员会, 1997. (Ministry of Electronics Industry of the People's Republic of China. GJB151A-1997 Electromagnetic emission and susceptibility requirements for military equipment and subsystems[S]. Beijing:Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1997.)
- [4] 中华人民共和国电子工业部. GJB152A-1997 军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量[S]. 北京:国防科学技术工业委员会, 1997. (Ministry of Electronics Industry of the People's Republic of China. GJB152A-1997 Electromagnetic emission and susceptibility requirements for military equipment and subsystems[S]. Beijing:Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1997.)
- [5] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. GJB151B-2013 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2013. (Electronic Information Basic Department, General Equipment Department, Chinese People's Liberation Army. GJB151B-2013 Electromagnetic emission and susceptibility requirements and measurements for military equipment and subsystems[S]. Beijing:Military Standard Publishing and Distribution Department, General Equipment Department, 2013.)
- [6] 中央军委装备发展部. GJB8848-2016 系统电磁环境效应试验方法[S]. 北京:国家军用标准出版发行部, 2016. (Central Military Commission Equipment Development Department. GJB8848-2016 Electromagnetic environmental effects test methods for systems[S]. Beijing:National Military Standard Publishing and Distribution Department, 2016.)
- [7] 古天翔,王厚军,习友宝,等. 电子测量原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2008. (GU Tianxiang,WANG Houjun,XI Youbao,et al. Principle of electronic measurement[M]. Beijing: China Mechanical Press, 2008.)
- [8] 秦顺友. 频谱仪测量低电平信号的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009(z1):51-55. (QIN Shunyou. Application study of measuring low level signal using spectrum analyzer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009(z1):51-55.)

作者简介:



范秋虎(1979-), 男, 哈尔滨市人, 硕士, 工程师, 现从事电子装备电磁兼容性测试与研究. email:30394517@qq.com.

何洪涛(1968-), 男, 河北省大名县人, 博士, 高级工程师, 现从事电子装备电磁兼容性测试与研究.

刘心愿(1991-), 男, 河南省信阳市人, 助理工程师, 现从事电子装备电磁兼容性测试与研究.

谭克松(1981-), 男, 辽宁省鞍山市人, 工程师, 现从事电子装备电磁兼容性测试与研究.